

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2014.02.016

# 流固耦合技术在某雕塑结构设计中的应用\*

宋婧婧<sup>1</sup>, 孙振旭<sup>2</sup>, 卢雷<sup>3</sup>, 原中晋<sup>4</sup>, 王强<sup>1</sup>

- (1. 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074, Email: jingjing.s@163.com;  
2. 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学实验室, 北京 100190;  
3. 中国建筑标准设计研究院, 北京 100048;  
4. 北京市建筑设计研究院, 北京 100045)

**摘 要:** 在某大型雕塑作品的设计中, 风力作用下雕塑结构的顶点位移至关重要, 它决定了作品能否实现预想中风吹草舞的景观效果。由于该雕塑不是单一结构, 它的各组成部分之间的流场干扰将对风荷载下的结构响应产生较大的影响, 所以为了对景观效果进行预测, 同时进一步验证结构在设计风速下的安全性, 在按规范进行风荷载校核之外, 该文建立了一种流固耦合的计算技术, 对雕塑结构进行了细致的分析。首先将该耦合方法应用于单一结构进行验证分析, 通过结构顶点最大位移的计算值与规范估算公式所得值的比较验证了该文方法的准确性; 在此基础上针对复杂雕塑结构进行了耦合分析, 给出了在不同强风条件下结构顶点的位移响应特性; 然后对不同风强条件下的安全性进行了评估, 确立了该雕塑作品在实际风条件下的适用性。

**关 键 词:** 流固耦合; 风荷载; 湍流模式; 节点位移

**中图分类号:** O351.2; O347.7

**文献标识码:** A

## Application of the fluid-structure interaction technique in the design of a giant sculpture

SONG Jing-jing<sup>1</sup>, SUN Zhen-xu<sup>2</sup>, LU Lei<sup>3</sup>, YUAN Zhong-jin<sup>4</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>

- (1. China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China;  
2. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. China Institute of Building Standard Design & Research, Beijing 100048, China;  
4. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China)

**Abstract:** During the design phase of a giant sculpture, which is assumed to stand as a landmark, it turns out that its top tip displacements under wind loads are crucial design criteria, dominating the landscape views and the structural responses. This

\* 收稿日期: 2013-07-01(2014-01-23 修改稿)

作者简介: 宋婧婧(1984 - ), 女, 黑龙江依兰人, 博士研究生。

通信作者: 孙振旭, Email: sunzhenxu@imech.ac.cn

Received: July 1, 2013 (Revised January 23, 2014)

Biography: SONG Jing-jing (1984-), Female, Ph. D. Candidate.

Corresponding author: SUN Zhen-xu, Email: sunzhenxu@imech.ac.cn

sculpture is not a single structure, instead, it's composed of eleven separated but closely arranged parts, which would exert significant influence on each other in the wind flow. So this article has developed a technology based on the concept of fluid-structure interaction, to evaluate the behavior of the sculpture under wind loads, to ensure both its scenery and structural performances. Firstly the coupled approach has been utilized to a single structure for validation. The numerical results of the maximum displacement of the top tip nodes agree well with the results from empirical estimation formula. Then fluid-solid coupling analysis on the real structure, and the displacement response characteristics of the top nodes under different strong wind conditions are obtained. Finally the safety of the structure under different wind conditions has been assessed, and the applicability of this sculpture in real conditions has been assured.

**Key words:** fluid-structural interaction; wind loads; turbulence model; nodal displacement

## 引言

现代雕塑设计为了追求艺术性,经常要求设计雕塑具有让人耳目一新的效果。常规雕塑通常是静止的,因而在设计时仅需要考虑静止状态下结构的强度。而本文则面向一类全新的雕塑设计,根据设计要求,该雕塑需要具有“风吹草动”的舞动效果。从力学角度讲,当雕塑舞动时,结构位置的相对变化会影响到周围流场,而流场改变则会影响结构承受的气动力,进而会导致结构发生进一步的位移变化。因而,这是一个非常典型的流固耦合问题。为了探讨该雕塑设计的适用性,也需要针对该雕塑进行不同来流条件下的流固耦合分析,为实际雕塑设计进行有效的理论支撑。本文针对该问题进行了详细分析。

## 1 工程概况和结构设计

本文所述的雕塑作品位于天津市。如图 1 所示,该雕塑由 11 片不锈钢叶片组成,单个叶片的高度为 18.18 m,宽度为 1.18 m。迎风时,每片雕塑从 12 m 高度处往上发生自由弯曲,预期其顶部的水平位移达到 1 m 左右,形成草叶迎风舞动的美丽场景。

该雕塑的寓意要求不锈钢叶片在风的作用下,有较大的舞动幅度。这要求结构具有相当的柔度,其刚度不宜太大。在结构设计中,较大的柔度往往意味着需要较高的结构应力水平。这时为了满足构件承载力的要求,就要增大构件截面,从而导致刚度增大,柔度减小,其后果就是舞动幅度减小。因此,合理的结构方案需要找到一个平衡点,既能实现风荷载作用下的舞动幅度,又能满足设计承载力的要求。基于这一考虑,本文确定的结构方案为每片雕塑均采用“内部钢龙骨+外包不锈钢板”的形式,通过调整钢龙骨的构件尺寸分布来控制其刚度和承载力两方面的要求。在龙骨设计中,外包不锈钢板的厚度假定为 1.5 mm。

结构设计时主要考虑结构自重、温度、地震荷载和风荷载等因素。按照规范考虑所有荷载组合并



(a) 雕塑的背景建筑群



(b) 夜景

图 1 雕塑景观效果图

Fig.1. Effect charts of sculpture landscape



图 2 龙骨的结构方案

Fig.2. Structural design of the keel

调整杆件截面之后,得到最终的杆件布置,其形式及应力比统计信息如图 2 和图 3 所示。

由于在本研究中无论是从结构设计的角度来看,还是考虑结构功能的因素,风荷载都起着至关重要的作用。因此在设计计算中,本文依照文献[1],

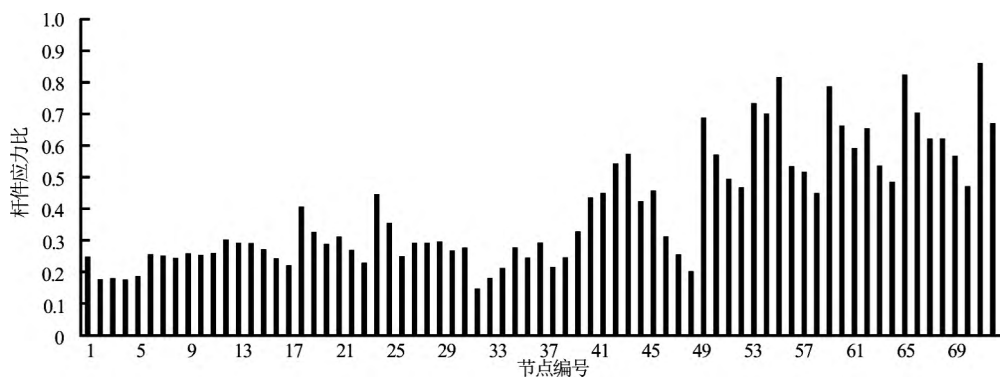


图 3 杆件应力比统计  
Fig.3. Statistics of the rod stress ratio

表 1 强风下风荷载沿高度的变化

Table 1. Variation of the wind loads along the height direction

| 高度 (m) | $\mu_s$ | $\mu_z$ | $v$  | $e$   | $\alpha$ | $\beta_z$ | $w_0$ | $w_k$ (kN/m <sup>2</sup> ) |
|--------|---------|---------|------|-------|----------|-----------|-------|----------------------------|
| 18     | 1.4     | 1.21    | 2.36 | 0.864 | 1.00     | 2.456457  | 0.55  | 2.28868112                 |
| 17     | 1.4     | 1.19    | 2.36 | 0.864 | 0.93     | 2.354505  | 0.55  | 2.15743306                 |
| 16     | 1.4     | 1.16    | 2.36 | 0.864 | 0.85     | 2.237989  | 0.55  | 1.99897139                 |
| 15     | 1.4     | 1.14    | 2.36 | 0.864 | 0.81     | 2.179730  | 0.55  | 1.91336724                 |
| 14     | 1.4     | 1.12    | 2.36 | 0.864 | 0.75     | 2.092343  | 0.55  | 1.80443648                 |
| 13     | 1.4     | 1.09    | 2.36 | 0.864 | 0.63     | 1.917568  | 0.55  | 1.60941482                 |
| 12     | 1.4     | 1.06    | 2.36 | 0.864 | 0.52     | 1.757358  | 0.55  | 1.43435537                 |
| 11     | 1.4     | 1.03    | 2.36 | 0.864 | 0.48     | 1.699099  | 0.55  | 1.34755576                 |
| 10     | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0.41     | 1.597147  | 0.55  | 1.22980352                 |
| 9      | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0.34     | 1.495195  | 0.55  | 1.15130048                 |
| 8      | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0.28     | 1.407808  | 0.55  | 1.08401216                 |
| 7      | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0.22     | 1.320421  | 0.55  | 1.01672384                 |
| 6      | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0.17     | 1.247598  | 0.55  | 0.96065024                 |
| 5      | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0.12     | 1.174775  | 0.55  | 0.90457664                 |
| 4      | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0.09     | 1.131081  | 0.55  | 0.87093248                 |
| 3      | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0.06     | 1.087387  | 0.55  | 0.83728832                 |
| 2      | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0.02     | 1.029129  | 0.55  | 0.79242944                 |
| 1      | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0.01     | 1.014565  | 0.55  | 0.78121472                 |
| 0      | 1.4     | 1.00    | 2.36 | 0.864 | 0        | 1.000000  | 0.55  | 0.77000000                 |

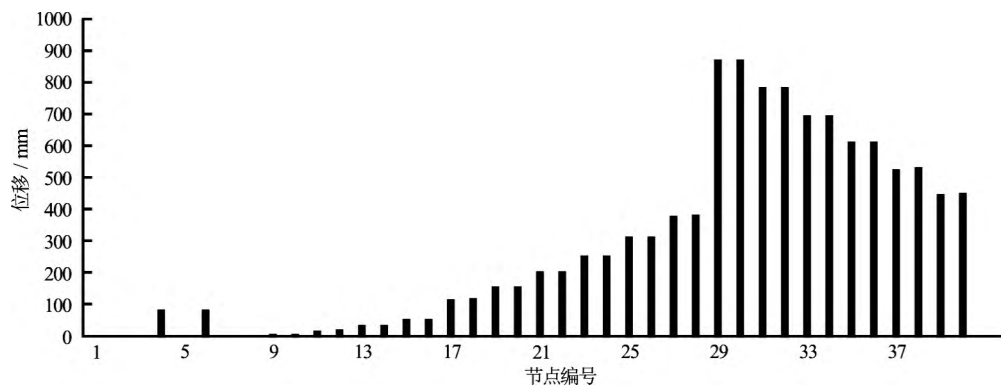


图 4 强风下龙骨节点的位移统计  
Fig.4. Displacement statistics of the keel nodes

详细考虑了风荷载沿结构高度的变化情况，其中不同高度处强风（30 m/s）下的风荷载值如表 1 所示，强风下结构龙骨节点位移统计如图 4 所示。

风荷载下雕塑结构的位移至关重要，它决定了雕塑作品能否实现预想的功能，形成风吹草舞的景

观效果。文献[1]针对风荷载给出的等效静载估算公式是建立在单一结构假设上的。但是本文雕塑作品并不是单一结构，在风场中，它的 11 个叶片相互之间的干扰将引起每个叶片的局部流场的变化，从而使每个叶片的结构响应与文献[1]公式的估计产

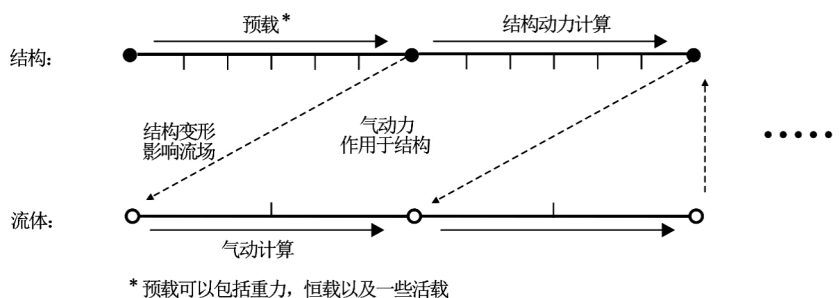


图 5 交错积分耦合计算过程图示  
Fig.5. Flow chart of the coupling process

生偏离。为了评估这一偏离对景观效果和结构安全性的影响，在按文献[1]方法进行风荷载校核之外，本文另外采用了一种流固耦合的计算技术，对雕塑结构进行了进一步的分析。

## 2 流固耦合计算方法

流固耦合研究始于 20 世纪 80 年代，是流体力学与固体力学交叉产生的一门独立力学分支，主要研究固体在流场作用下的各种行为以及固体变形或运动对流场的影响。流固耦合力学的重要特征是两相介质之间的交互作用：即固体在流体载荷作用下会产生变形或者运动，而固体的变形或运动又反过来影响流场，从而改变流场载荷的分布和大小<sup>[2]</sup>。流固耦合问题并不是流体问题和结构问题的简单相加，特别是对非定常的流固耦合问题，若采用原来分别用来求解流体和结构问题的方法，如果处理不当，就会引起整个系统的计算不稳定从而导致计算失败或计算结果失真。

目前对于流固耦合的分析方法主要可以分为两大类<sup>[3]</sup>：频域分析法和时域分析法。频域分析法将结构和流场的运动表示为时间的谐波函数，并将流固耦合问题简化为特征值问题。该方法的局限在于线性结构方法和由于结构变形引起的线性气动力，难于实现带有强结构和气动非线性流固耦合问题的计算。时域分析方法在时间历程上分析流场和结构的变换得到结构的流固耦合特性。该方法通过在时域中求解结构响应和气动力变换，可以弥补频域方法的不足。时域分析方法又可以分为三类：即古典分析方法、整体积分法和交错积分耦合法。其中后两类方法即为通常所称的紧耦合方法和松耦合方法，这两类方法近年来不断有新的研究成果问世。紧耦合方法将流体和结构视为通过流固耦合界面连接的单一介质，通过统一的控制方程联合求解。该方法要求建立全新的方程和求解器，需要大量的重新建模工作。而松耦合方法可以充分利用现有的流体和结构计算手段，通过交错时间推进即可

完成结构-气动计算的耦合求解。综上所述，本文采用交错积分耦合法（松耦合方法）来进行计算分析。

在实际计算时，气动和结构数据传输的时间顺序如图 5 所示。初始状态下，结构计算先以静力方法考虑预载引起的变形，将之反馈于流体软件用于考虑流场网格变形，接着气动软件进行第一次流场计算，得到结构表面的压力值；随后通过界面插值算法<sup>[4,5]</sup>，将该压力从流体网格映射到结构界面网格上；然后在获得表面压力值后，结构程序获得了输入条件，即可以进行结构动力计算，得到固体表面的结构位移量；最后结构位移传递到流体网格中，流体网格再次进行网格变形，得到新的计算网格，至此即完成耦合计算的一次数据传输。整个耦合计算就是如此往复进行，本文耦合过程在 MPCCI 流固耦合平台下完成。

### 2.1 流体计算方法

本文采用 RANS 方法进行流固耦合研究，而选取合适的湍流模式则是正确预测钢片的气动力的关键。在双方程模式中，如  $k-\varepsilon$  模式<sup>[6]</sup>，可以较好地模拟远离壁面充分发展的湍流流动，但是在近壁面附近会对湍流的输运作用估计过度，使流动分离延迟或者不发生流动分离，从而降低了求解存在逆压梯度和流动分离问题的精度。而 Wilcox 的经典  $k-\omega$  双方程模式<sup>[7]</sup>在求解壁面边界层流动以及自由剪切流方面具有非常良好的性能，可以更为广阔地应用于各种压力梯度下的边界层问题。但是该模式却对自由来流中的  $\omega$  值过度敏感，而  $k-\varepsilon$  模式却不存在这个问题。为了集合上述两种模型的特点，本文采用了由 Menter 提出的  $k-\omega$  SST 模式<sup>[8]</sup>，它是一种在工程上得到广泛应用的混合模式，在近壁面保留了原始  $k-\omega$  的模型，而在远离壁面的地方应用  $k-\varepsilon$  模型。

在本文工况下，流场的可压缩性与热传导效应均可以忽略，因而流动方程可以写为：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

其中:  $\rho$ 、 $u_i$  和  $p$  分别是密度、速度和压强。 $\mu_t$  为涡黏系数, 在  $k-\omega$  SST 模型中其表达式可以写为

$$\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \quad a_1 = 0.31 \quad (3)$$

$k-\omega$  SST 模型的两个输运方程形式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j k) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_t + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \bar{\rho} \beta_k k \omega \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{\rho}\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \omega) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_t + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \gamma \frac{\omega}{k} \cdot P_k - \\ \bar{\rho} \beta_\omega \omega^2 + \frac{2\bar{\rho}(1-F_1)\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (5)$$

$k-\omega$  SST 模型中的常数  $\phi$  可以表示为

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1-F_1) \phi_2 \quad (6)$$

其中: 当  $F_1$  在近壁面区域趋近于 1 时, 模型近似于  $k-\omega$  模型; 远离壁面  $F_1$  趋近于 0 时, 模型转化为  $k-\varepsilon$  模型, 这样就可以将这两种模型的优点结合起来。其中:  $\sigma_{k1} = 0.85$ ,  $\sigma_{\omega 1} = 0.5$ ,  $\beta_1 = 0.075$ ,  $\beta^* = 0.09$ ,  $\gamma_1 = 0.553$ ,  $\sigma_{k2} = 1.0$ ,  $\sigma_{\omega 2} = 0.856$ ,  $\beta_2 = 0.0828$ ,  $\beta^* = 0.09$ ,  $\gamma_2 = 0.440$ 。

开关函数  $F_1$  和  $F_2$  定义为到壁面最小距离的函数, 可表示为:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (7)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (8)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( \frac{2\bar{\rho}\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20} \right) \quad (9)$$

$$P_k = \min \left( \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, 20\beta^* k \omega \right) \quad (10)$$

其中  $y$  表示到物面的最小距离。

## 2.2 结构动力计算方法

由于本文的流固耦合计算依赖的是时域方法, 所以在结构计算中采用动力学方法, 以得到结构响应的时历程。

结构动力学方程为

$$M^{nm} \ddot{u}^m + I^n - P^n = 0 \quad (11)$$

其中:

$$M^{nm} = \int_{V_0} \rho^0 N^n \cdot N^m dV_0 \quad (12)$$

为一致质量矩阵,  $\rho$  为密度,  $N$  为插值函数;

$$I^n = \int_{V_0} B^{nT} \sigma^n dV_0 \quad (13)$$

为内力向量, 其中  $B$  为应变矩阵,  $\sigma$  为应力;

$$P^n = \int_S N^n \cdot T t dS + \int_V N^n \cdot F dV \quad (14)$$

为外力向量, 其中  $T$  为边界分布力,  $t$  为二维单元厚度,  $F$  为体积力。

求解上述动力方程就是计算结构响应的过程。

## 3 流固耦合结果分析

### 3.1 单叶片验证

流固耦合涉及到复杂的数据交互过程, 到目前为止, 尚没有足够的文献资料可以界定其有效性。为了验证本文方法的有效性, 并对分析模型进行标定, 首先对单一叶片作了强风下的计算, 将结果与文献[1]给出的估算公式进行了对比。

文献[1]给出的风荷载计算公式为:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (15)$$

式中:  $w_k$  是风荷载标准值;  $\beta_z$  是高度  $z$  处的风振系

数； $\mu_s$  是风荷载体型系数； $\mu_z$  是风压高度变化系数； $w_0$  是基本风压。各参数按强风考虑的取值如表 1 所示。具体各参数的计算方法详见参考文献[1]。

由于文献[1]是在单一结构的假设下给出的，并经过了长时间的实践验证，所以可认为对于单一叶片来说，文献[1]给出的等效静载可以用于估算结构实际工作状态下的真实动态响应。

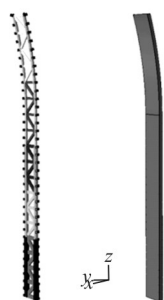


图 6 结构分析模型

Fig.6. Structure model in CSD analysis

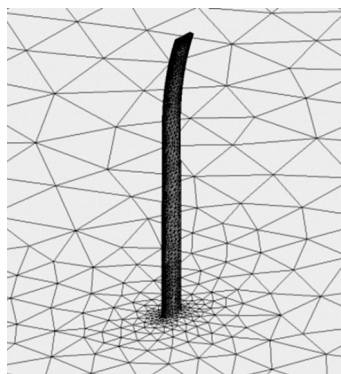


图 7 流体分析模型

Fig.7. Fluid model in CFD analysis

建立单一叶片的结构模型和流场模型分别如图 6 和图 7 所示。其中固体网格量约为 1.2 万，流场采用混合网格生成，在物面附近建立边界层，控制  $y^+$  在 30~100 之间，满足壁面函数要求，流场整体网格量约为 48 万。风速参考强风标准，取为 30 m/s。流场非定常时间步长为 0.001 s。

计算得到结构顶点的最大位移为 0.884 m，该值与由文献[1]估得的等效静载计算所得的顶点位移 (0.877 m) 吻合很好，差值在 1% 以内。

观察耦合计算中风场在结构迎风面和背风面所引起的压强差的变化，可知叶片顶端处压强差的峰值为 2100 Pa，其中迎风向 +650 Pa，背风向 -1550 Pa。该峰值与结构出现最大位移的时间点大体吻合，略有一点时间差。该峰值与文献[1]估算公式得出的等效静载 2289 Pa (见表 1) 吻合良好，差值约为 9%。

由上述结果可知，文献[1]公式与耦合计算得到的顶点压强有 9% 的差别，而两者的顶点位移之差

仅为 1%。因此可认为，这两个值的不匹配是由两者压强的竖向分布不一致所造成的，其原因在于叶片在竖向并不规则。

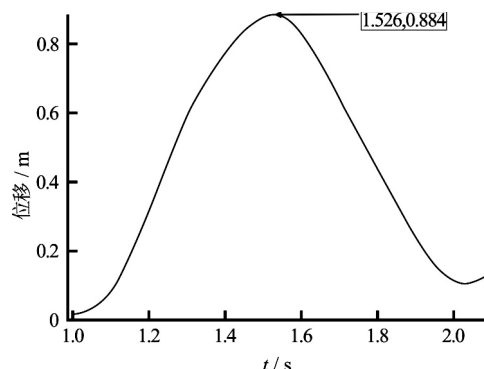
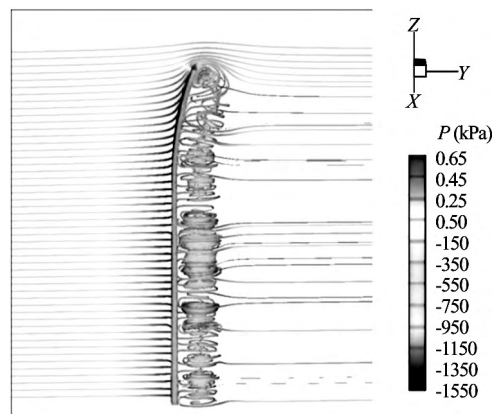
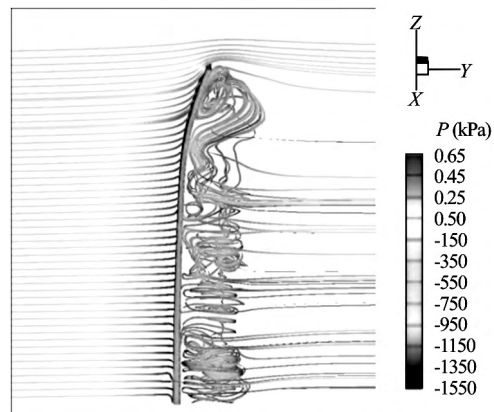


图 8 耦合计算得到的结构顶点位移变化曲线  
Fig.8. Displacement variation of the top of the structure during the coupling process



(a) 初始时刻



(b) 位移峰值时刻

图 9 耦合计算得到的流线图  
Fig.9. Streamlines around the structure during the coupling process

顶点在 2.1 s 内的位移曲线如图 8 所示。流场在初始时刻和结构位移峰值时刻的流线如图 9 所示。

由上述分析可知，耦合计算可以保证足够的精度。由此可认为，将这一方法推广到 11 个叶片的

系统,也能够计算出可靠的结果。

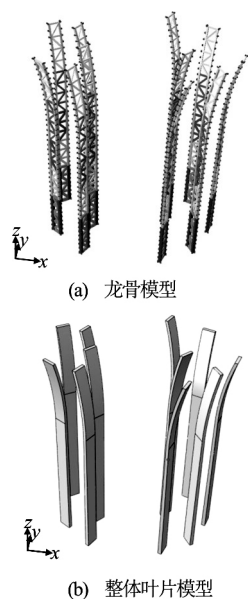


图 10 结构分析整体模型

Fig.10. Structural model of the sculpture in CSD analysis

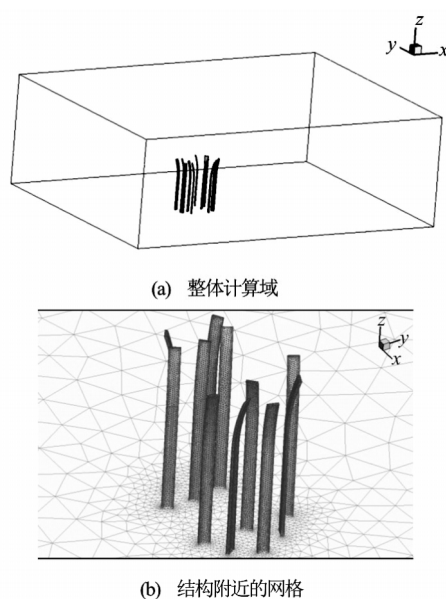


图 11 流体分析整体模型

Fig.11. Computational domain and mesh for CFD analysis

### 3.2 整体结构耦合分析

建立结构模型和流场模型分别如图 10 和图 11 所示。针对复杂雕塑模型,结构部分整体网格量约为 13.2 万,流场仍采用混合网格形式,整体网格量约为 510 万,耦合时间步长与单片结构分析一致,风速取为 30 m/s。流场模型包括两类:即  $x$  向来流和  $y$  向来流两种工况。图 11 给出了  $x$  向来流条件下的计算域以及在钢片附近的流场网格。

计算得到耦合过程中的流线图如图 12 所示。

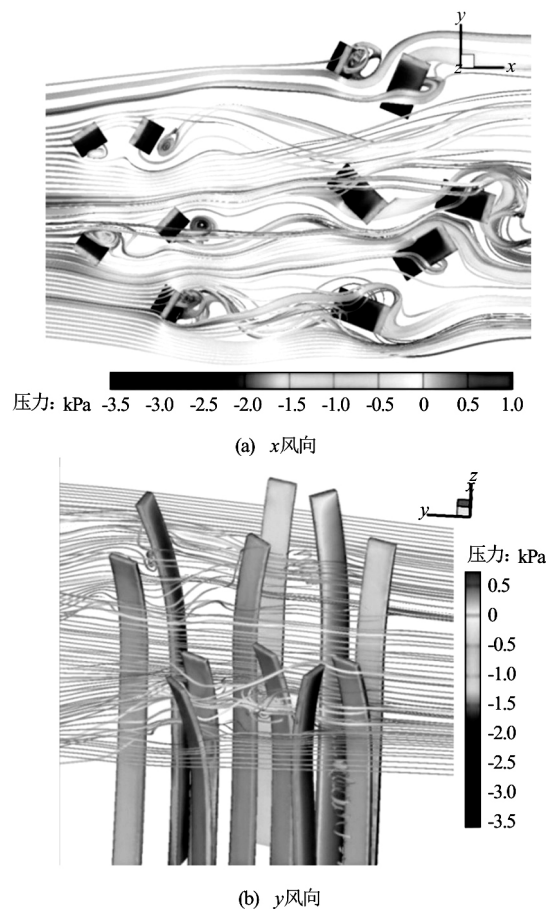


图 12 整体耦合计算得到的流线图

Fig.12. Streamlines around the sculpture

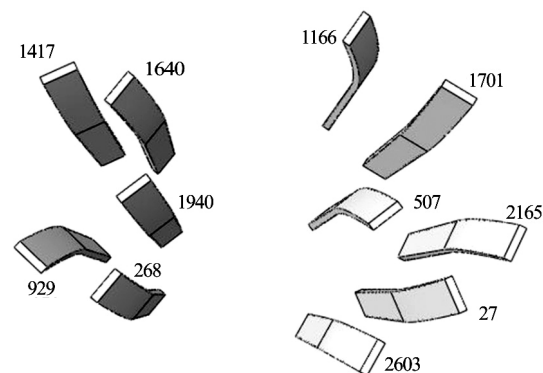
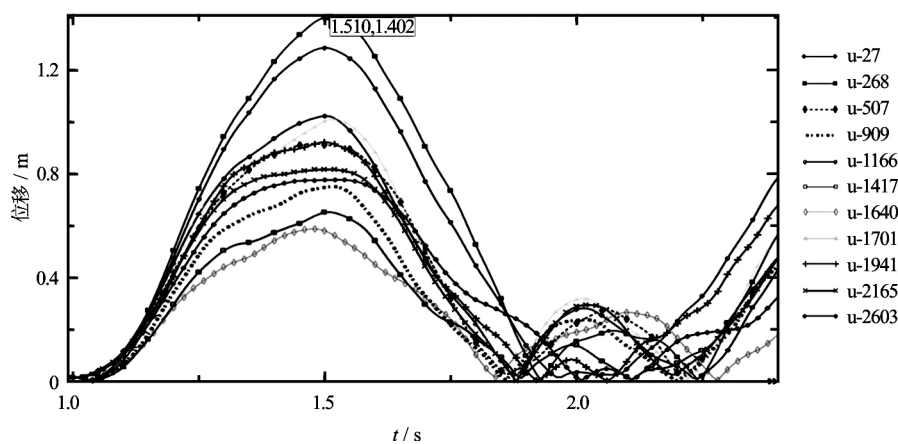
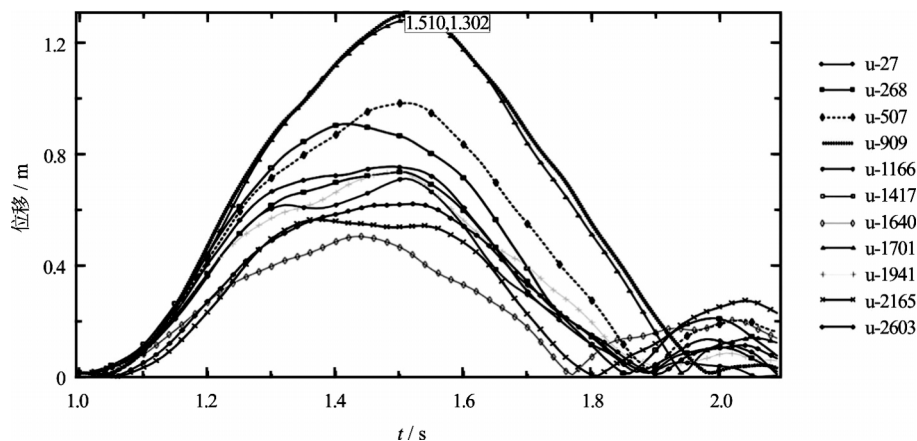


图 13 11 个叶片的编号

Fig.13. Numbering for each leaf

将 11 个叶片编号如图 13 所示。 $x$  风向和  $y$  风向下顶点的位移变化曲线如图 14 和图 15 所示。

受来流风速的影响,叶片出现了风吹草动的舞动效果,且在振动上出现了周期性。图 14 和图 15 为一个多周期内的位移变化曲线。由上述结果可知,由于叶片相互之间的干扰,使得部分叶片的位移峰值超出根据文献[1]计算得出的值,超出部分最大可达 60%,最大位移达到 1.5 m。从图 14 中可以看到, $x$  方向最大位移出现在编号为 268 的叶片上,

图 14  $x$  风向 11 个叶片顶点位移曲线Fig.14. Displacement of the top of each leaf in  $x$  direction图 15  $y$  风向 11 个叶片顶点位移曲线Fig.15. Displacement of the top of each leaf in  $y$  direction

$y$  方向最大位移出现在编号为 929 的叶片上, 出现时间均为 1.5 s 左右。

进一步的分析表明, 设计方案即使在上述位移下, 其应力仍在可允许的范围内。此外, 观察耦合分析的动态过程可以看到, 叶片之间并未发生相互碰撞。由此表明, 在现行风载荷条件下, 该雕塑设计可以达到预期效果, 且设计方案能够保证叶片结构在整体位移响应过程中在受力上的安全性。

## 4 结论

本文针对某大型雕塑作品的风荷载计算, 结合流体、固体商用计算软件, 开发出一套适合于工程应用的流固耦合计算方法, 对雕塑结构顶点在流致振动中产生的位移进行了详细分析。

首先为了验证方法的准确性, 本文将该耦合方法应用于单一结构进行了分析, 将结构顶点最大位移的计算值与规范估算公式所得的值进行了比较。

比较结果表明两种方法的误差在 1% 以内, 验证了本文方法的准确性。在上述工作的基础上, 本文针对包括多个单体结构的整体雕塑模型进行了流固耦合分析, 研究了其在不同方向强风条件下结构顶点的位移响应特性。整体结构中, 各个叶片之间可以形成复杂的涡致振动, 从而对不同位置的叶片形成或正或负的干扰作用。研究表明, 在两个相互正交的来流方向下, 个别叶片的顶点最大位移会超出规范公式估算的值, 但是即使在这一情况下, 设计方案仍能保证结构在受力上的安全性。此外从计算结果中可以观察到, 在整体结构发生风致位移的时变历程中, 各叶片顶点不会形成碰撞, 这进一步说明了本文设计方案的安全性。

上述结果表明, 对于流场环境复杂的结构, 本文所采用的流固耦合分析方法, 具有相当的优越性。第一, 相对于依照规范公式的设计方法而言, 它能够更精确、直观地预估结构的安全性和功能性; 第二, 相比于紧耦合方法等别的流固耦合格式而言, 它能够最大限度地利用现有成熟的分析手段和计算模型, 大大缩短建模时间, 并提高计算的可



靠性; 第三, 该方法实际上已经可以部分地实现风洞实验的功能, 且相较于风洞实验, 计算的成本更低, 更有利于了解流场的演变细节, 为深入理解结构的风致振动问题提供了有益帮助。

超高层和复杂结构的风振一直是工程设计和学术研究中极为重要的话题。与超高层和大跨等复杂结构相比, 本文所针对的项目规模要小得多。但是本文所采用的技术, 可以推广应用于这些场合。将本文所采用的技术推广到超高层和复杂结构, 有助于较为根本地解决现有结构设计的一些疑难问题, 如舒适度。现有的舒适度分析是基于规范给定的评估加速度的公式; 而在流固耦合计算的基础上, 不仅能够较为准确地给出风致结构加速度的时间历程谱, 还可以考虑引入声场分析等手段, 更为全面地考虑舒适度问题。当然在推广中, 模型须作何种简化, 格式须作何种调整, 尚有哪些因素须计入计算模型, 诸如此类的问题, 还有待进一步的应用研究。

此外, 考虑到流固耦合研究的复杂性, 本文在计算时进行了一定程度的简化。在后续计算中, 可加入近场建筑物到计算模型中, 并遵从风洞实验的惯例, 取更多的风向进行计算验证。但这两个考虑因素都会极大地增加计算量, 要求更高的计算机硬件配置以及更长的计算时间, 因此, 未来将展开进一步的研究, 使计算过程更为经济有效。

## 参 考 文 献:

- [1] 建筑结构荷载规范[S]. GB50009-2001, 中国, 2002.  
Load code for the design of building structures[S].  
GB50009-2001, China, 2002.

- [2] 刑景棠, 周盛, 崔尔杰. 流固耦合力学概述[J]. 力学进展, 1997, 27(1): 19-38.  
JING Jing-tang, ZHOU Sheng, CUI Er-jie. A survey on the fluid-solid interaction mechanics[J]. Advances in Mechanics, 1997, 27(1): 19-38.
- [3] DOWELL E H. A modern Course in Aeroelasticity[M]. The Netherlands: Springer, 2005.
- [4] SMITH M J, HODGES D H, CESNIK C E S. Evaluation of computational algorithms suitable for fluid-structure interactions[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(2): 282-294.
- [5] KIM Y H, KIM J E. A new hybrid interpolation method using surface tracking fitting and smoothing function applied for aero-elasticity[M]. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Austin, USA, 2005.
- [6] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.
- [7] WILCOX D C. Multi-scale model for turbulent flows[C]. AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting, Reno, USA, 1986.
- [8] MENTER F R. Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows[M]. 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida, USA, 1993.